

برآورد تبخیر و تعرق واقعی گندم و کلزا با استفاده از الگوریتم سبال (مطالعه موردی: ایستگاه تحقیقات کشاورزی اسماعیل آباد استان قزوین)

مهدی یونسی^۱، محمود مشعل^{۲*}، افشین یوسف گمرکچی^۳

۱. دانشجو کارشناسی ارشد، گروه مهندسی آب، دانشکده‌های ابوریحان، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۲. دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده‌های ابوریحان، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۳. استادیار بخش تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان قزوین،

سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، قزوین، ایران

(تاریخ دریافت ۱۴۰۰/۱۲/۰۸؛ تاریخ بازنگری ۱۴۰۱/۰۱/۳۰؛ تاریخ تصویب ۱۴۰۱/۰۲/۳۱)

چکیده

تبخیر و تعرق پدیده پیچیده‌ای است که به عوامل و داده‌های زیادی وابستگی دارد، بنابراین تعیین آن، بسیار مشکل و پرهزینه است. در اغلب روش‌هایی که بیشتر با هدف برآورد تبخیر و تعرق ارائه شده، از اندازه‌گیری‌های نقطه‌ای برای تخمین این متغیر استفاده شده است. بنابراین، فقط در مقیاس محلی مناسب است و به سبب پویایی و تغییرات منطقه‌ای تبخیر و تعرق (ET) قابل تعمیم به حوضه‌های بزرگ نیست. یکی از الگوریتم‌های سنجش از دور برای برآورد تبخیر و تعرق واقعی الگوریتم بیلان انرژی سطح زمین (سبال) است. در این الگوریتم از طریق برآورد همه مؤلفه‌های انرژی در سطح زمین از جمله شار تابش خالص، شار گرمای خاک، و شار گرمای محسوس و با استفاده از معادله بیلان انرژی به محاسبه تبخیر و تعرق اقدام می‌شود. هدف از انجام این تحقیق، مقایسه برآورد تبخیر و تعرق واقعی با استفاده از الگوریتم سبال در دو محصول گندم و کلزا با نتایج برآورد تبخیر و تعرق به روش پنمن-مانتیت-فائو در محدوده ایستگاه تحقیقات کشاورزی اسماعیل آباد، در سال زراعی ۱۳۹۸-۱۳۹۹ است. آزمون آماری T تک‌نمونه‌ای شاخص بازتاب دمای سطح زمین نشان داد بازتاب طیفی دو محصول گندم و کلزا طی دوره رشد فنولوژیک تفاوت معناداری با هم داشته است. نتایج تحقیق نشان داد مقادیر محاسباتی دو مدل مطابقت نسبتاً خوبی با هم دارند و مقدار میانگین جذر مربعات خطا (RMSE) در برآورد تبخیر و تعرق واقعی برای گیاهان گندم و کلزا به ترتیب ۳/۰۴ و ۲/۰۹ میلی‌متر بر روز به دست آمد و مقدار ضریب تبیین (R^2) نیز به ترتیب ۰/۷۸ و ۰/۸۱ بوده است. نتایج نشان داد مدل الگوریتم سبال در مقایسه با مدل پنمن-مانتیت-فائو (براساس داده‌های بهنگام هواشناسی)، مقدار تبخیر و تعرق را برای گیاه گندم و کلزا کمتر برآورد می‌کند.

کلمات کلیدی: تبخیر و تعرق، سبال، پنمن-مانتیت، سنجش از دور، قزوین.

مقدمه

تخمین تبخیر و تعرق یکی از پارامترهای مهم در مدیریت منابع آب است که برآورد دقیق آن با مشکلات و پیچیدگی‌های خاصی روبه‌رو است. با توجه به محدودیت روش‌های فیزیکی و تجربی برآورد تبخیر، استفاده از فناوری سنجش از دور به دلیل امکان برآورد مکانی اطلاعات و همچنین حداقل کردن استفاده از داده‌های هواشناسی می‌تواند کاربرد وسیعی در محاسبه تبخیر و تعرق داشته باشد. الگوریتم سبال (SEBAL) یکی از الگوریتم‌های پرکاربرد سنجش از دور است که تعادل انرژی سطحی لحظه‌ای را برای هر پیکسل از یک تصویر ماهواره‌ای محاسبه می‌کند و براساس آن، تبخیر و تعرق گیاه را براساس تعادل لحظه‌ای انرژی محاسبه می‌کند. از سوی دیگر، با توجه به آنکه وجود نگرش‌هایی در راستای تشخیص و تفسیر الگوهای نهفته در داده‌ها، منطقی است که منجر به خوشه‌بندی داده‌ها می‌شود [۱]، بنابراین از قابلیت‌های روش‌های داده‌کاوی می‌توان به منظور بهبود نتایج خروجی مدل‌های تخمین تبخیر و تعرق و تحلیل دقیق‌تر اطلاعات مبتنی بر تصاویر ماهواره‌ای نیز استفاده کرد.

پیشینه تحقیق

الگوریتم بیلان انرژی سطح زمین (SEBAL) اولین بار به وسیله Bastiaanssen و همکاران در سال ۱۹۹۸ ارائه و در سال ۲۰۰۰ دوباره به‌روز شد [۲]. الگوریتم سبال تا کنون در مطالعات گوناگونی در نقاط مختلف دنیا به کار رفته و صحت‌سنجی شده است. باستیانسن و همکاران (۲۰۰۲) این الگوریتم را به منظور شناسایی مناطق دارای کمترین میزان ET در حوضه سند پاکستان مورد استفاده قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که اطلاعات مکانی و زمانی میزان ET واقعی برای ارزیابی توزیع و مصرف آب در حوضه‌های بزرگ مفید است [۳]. راموس و همکاران (۲۰۰۹) با استفاده از الگوریتم SEBAL مقادیر ET سالانه منطقه Flument دشت Ebro را در شمال شرقی اسپانیا تخمین زدند و با مقادیر لایسیمتری مقایسه کردند. نتایج پژوهش یادشده نشان داد الگوریتم SEBAL قادر به برآورد نسبتاً دقیق ET روزانه برای گندم، ذرت و چمن است [۴]. آوادا و همکاران (۲۰۲۱) به برآورد تبخیر و تعرق واقعی در اکوسیستم مدیترانه‌ای به کمک الگوریتم سبال و تصاویر

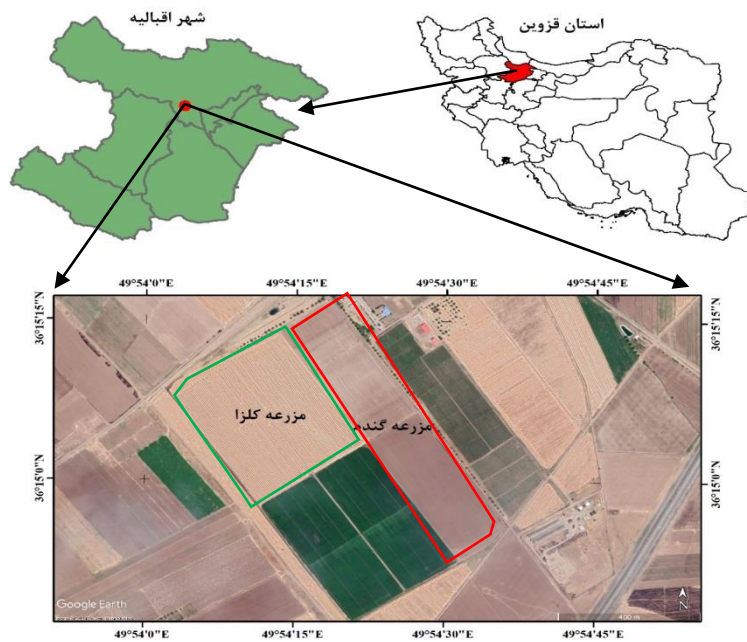
لندست ۵ و ۸ پرداختند. نتایج پژوهش آن‌ها بیانگر آن بود که مقادیر R^2 ، RMSE و MAE به ترتیب برابر با ۰/۷۷، ۰/۰۵ و ۰/۰۷۶ بوده است [۵]. لی و همکاران (۲۰۲۱) نیز به ارزیابی الگوریتم سبال در شمال غربی چین پرداختند. آن‌ها از تصاویر لندست، مادیس و AVHRR استفاده کردند. نتایج تحقیق یادشده نشان داد توزیع فضایی تبخیر و تعرق برآوردشده از سه مجموعه داده ماهواره‌ای مشابه بوده، در حالی که تبخیر و تعرق به‌دست‌آمده از MODIS بیشترین عدم اطمینان را داشته است [۶]. همچنین، در تحقیقات انجام‌شده در داخل کشور نیز از الگوریتم سبال به منظور تحلیل تبخیر و تعرق گیاهی استفاده شده است. کریمی و همکاران (۱۳۹۱) به برآورد تبخیر و تعرق واقعی گیاه ذرت در مقیاس منطقه‌ای با استفاده از الگوریتم سبال و تصاویر لندست ۵ پرداختند. نتایج تحقیق یادشده نشان داد حداکثر خطای تخمین بین الگوریتم سبال و اطلاعات لایسیمتری در محدوده مطالعه‌شده کمتر از ۱۰ درصد بوده است [۷]. خوشنواز و همکاران (۱۳۹۴) به تخمین بهره‌وری آب کشاورزی به کمک سنجش از دور در شبکه آبیاری دشت قزوین پرداختند. نتایج تبخیر و تعرق به‌دست‌آمده توسط معادله پنمن-مانتیث-فائو و الگوریتم سبال نشان داد این دو روش با یکدیگر انطباق داشته است [۸]. کرباسی و همکاران (۱۳۹۵) تبخیر و تعرق واقعی گیاهان ذرت و یونجه را با استفاده از الگوریتم سبال در منطقه خرم‌دره استان زنجان تخمین زدند. نتایج به‌دست‌آمده از پژوهش یادشده از مدل FAO-PM 56 را با الگوریتم سبال مقایسه کردند. نتایج تحقیق یادشده نشان داد مقدار میانگین جذر مربعات خطا (RMSE) به ترتیب ۰/۹۲ و ۱/۲۵ میلی‌متر بر روز و مقدار ضریب تبیین (R^2) نیز به ترتیب ۰/۸۹ و ۰/۸۳ بوده است [۹]. ملک‌پور و همکاران (۱۳۹۵) از الگوریتم سبال و تصاویر لندست ۵ برای برآورد تبخیر و تعرق واقعی گندم در دشت قزوین استفاده کردند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد این روش دقت قابل قبولی برای محاسبه تبخیر و تعرق در دشت قزوین داشته است [۱۰]. همچنین، نتایج تحقیق زمان‌ثانی و همکاران (۱۳۹۶) نشان داد اختلاف معناداری بین نتایج حاصل از الگوریتم سبال و اطلاعات لایسیمتری در برآورد تبخیر و تعرق گندم در شهرستان حاجی‌آباد وجود نداشته است [۱۱]. قادری و همکاران (۲۰۲۰) از الگوریتم سبال و تصاویر لندست ۸ برای برآورد تبخیر و تعرق واقعی در منطقه عین‌خوش استان ایلام استفاده کردند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد مقادیر خطای

قابلیت‌های سنجش از دور، تبخیر و تعرق واقعی در دشت‌ها و یا ترکیب کشت محصولات مختلف زراعی و باغی انجام گرفته است. ولی در تحقیق حاضر از قابلیت‌های فناوری سنجش از دور برای برآورد تبخیر و تعرق واقعی و نیاز آبی بهنگام در مزرعه تحت پوشش سامانه آبیاری تحت فشار (سامانه آبیاری لینیئر) واقع در ایستگاه تحقیقات کشاورزی اسماعیل‌آباد استفاده شده است.

مواد و روش‌ها

این تحقیق روی دو سامانه آبیاری لینیئر تحت کشت دو گیاه گندم و کلزا واقع در ایستگاه تحقیقات کشاورزی اسماعیل‌آباد با مختصات جغرافیایی ۳۶ درجه و ۱۵ دقیقه و ۱۷ ثانیه شمالی و ۴۹ درجه و ۵۴ دقیقه و ۲۸ ثانیه شرقی در حومه غربی شهر قزوین قرار گرفته است (شکل ۱). با توجه به آنکه یک ایستگاه هواشناسی کشاورزی نیز در محدوده اراضی مورد مطالعه قرار گرفته، امکان برآورد دقیق تر نیاز آبی محصولات تحت کشت فراهم شده است. در این راستا اطلاعات نیاز آبی دو محصول گندم و کلزا براساس اطلاعات بهنگام هواشناسی ایستگاه یادشده محاسبه شده و با مقادیر برآوردشده براساس الگوریتم سبال، مورد مقایسه قرار گرفته است.

میانگین مربع ریشه (RMSE)، خطای میانگین درصد مطلق (MAPE)، خطای بایاس میانگین (MBE) و ضریب همبستگی در مقایسه با روش پنمن-مانتیث-فائو به ترتیب برابر با ۰/۴۶۶، ۲/۹ درصد، ۰/۲۲۲ میلی‌متر بر روز و ۰/۹۷ بود [۱۲]. محمودزاده و انوری (۱۴۰۰) به صحت‌سنجی تبخیر و تعرق به‌دست‌آمده با الگوریتم سبال توسط لندست ۸ پرداختند. نتایج پژوهش یادشده نشان داد مقادیر شاخص‌های RMSE، SEE و R^2 نسبت به اندازه‌گیری‌های تشت تبخیر به ترتیب ۰/۷۶، ۰/۷۷ و ۰/۹۱، ۰/۹۱ و ۰/۹۲ میلی‌متر بر روز است [۱۳]. بررسی تحقیقات انجام‌شده بیانگر آن است که با استفاده از الگوریتم سبال می‌توان تبخیر و تعرق گیاهان را با دقت قابل قبولی برآورد کرد. نتایج مطالعات انجام‌شده با محوریت برآورد تبخیر و تعرق گیاهی نشان‌دهنده آن است که استفاده از رویکردهای سنجش از دوری همانند الگوریتم SEBAL برای برآورد مقادیر تبخیر و تعرق در قیاس با روش‌های دیگر، کارایی قابل قبولی داشته است. اهمیت برآورد مقادیر دقیق تبخیر و تعرق به‌خصوص برای اراضی کشاورزی واقع در قطب‌های کشاورزی همچون دشت قزوین ضرورت دارد و می‌تواند به عنوان ابزاری کارآمد جهت تحلیل بهره‌وری آب کشاورزی محسوب شود. پژوهش‌های انجام‌شده با محوریت برآورد تبخیر و تعرق واقعی بیشتر متمرکز بر محدوده‌های وسیع بوده و با استفاده از



شکل ۱. نمایی از مزارع ایستگاه تحقیقاتی کشاورزی اسماعیل‌آباد

مرحله اولیه، مرحله توسعه‌ای، مرحله میانی و مرحله پایانی) در محصول گندم به ترتیب برابر با ۱۱۰، ۴۰، ۷۰ و ۲۰ روز از تاریخ کاشت محصول [۱۴] و برای کلزا نیز به ترتیب برابر با ۱۵۰، ۲۰، ۷۰ و ۲۰ روز پس از تاریخ کاشت محصول است [۱۵].

داده‌های ماهواره‌ای و نرم‌افزارهای استفاده شده
برای انجام این تحقیق از تصاویر ماهواره لندست ۸ استفاده شد که مشخصات آن در جدول ۱ اشاره شده است. همچنین، از سامانه Google Earth Engine برای انجام پردازش‌های تصویری و اجرای الگوریتم سبال استفاده شده است.

بر این اساس، داده‌های مورد نیاز برای برآورد نیاز آبی به دو گروه داده‌های زمینی و داده‌های ماهواره‌ای تقسیم شده‌اند. داده‌های زمینی شامل، اطلاعات بهنگام هواشناسی، مقدار حجم آب آبیاری طی فصل زراعی و داده‌های ماهواره‌ای شامل، تصاویر ماهواره لندست ۸ در بازه زمانی ۱۳۹۸/۰۸/۲۰ تا ۱۳۹۹/۰۴/۱۵ (۲۴ تصویر بدون ابر) برای محصول گندم و در بازه زمانی ۱۳۹۸/۰۷/۰۱ تا ۱۳۹۹/۰۴/۱۰ (۲۹ تصویر بدون ابر) برای محصول کلزا بوده است. تاریخ کاشت گندم و کلزا در منطقه معمولاً از اوایل مهرماه تا اواخر آبان‌ماه است و برداشت این دو محصول نیز از اوایل خردادماه تا اواخر تیرماه به طول می‌انجامد. همچنین، مراحل چهارگانه رشد

جدول ۱. مشخصات ماهواره استفاده شده در انجام تحقیق

نام ماهواره	نام سنجنده	تعداد باندها	قدرت تفکیک مکانی (متر)	چرخه تکرار (روز)	زمان عبور از ایران (ساعت)	زاویه میل (درجه)	عرض گذر نواری (کیلومتر)
لندست ۸	تصویر بردار عملیاتی زمین (OLI)	۸	۱۵،۳۰	۱۶	۷:۳۰ - ۷	۹۸/۲	۱۸۵
	سنسور مادون قرمز حرارتی (TIRS)	۲	۱۰۰				

شاخص سطح برگ (LAI^۴)، نسبت سطح کل برگ‌های گیاه به سطح زمین پوشانده شده توسط گیاه تعریف می‌شود. این شاخص مقاومت به زیست‌توده (Biomass) و سایبان (Canopy) است. همچنین، از این شاخص برای محاسبه پوشش شاخ و برگ، پیش‌بینی رشد و عملکرد محصول استفاده می‌شود. بازه این شاخص بین ۰ تا ۳/۵ است، هنگامی که تصویر حاوی ابر و سایر ویژگی‌های روشن باشد باعث تولید پیکسل‌های اشباع می‌شود که مقادیر LAI می‌تواند از ۳/۵ فراتر رود. باید قبل از ایجاد تصویر LAI، ابرها و ویژگی‌های روشن از تصویر حذف شوند که توسط رابطه ۲ قابل محاسبه است [۱۷].

$$LAI = 3.618 \times \left(2.5 \times \frac{NIR - Red}{NIR + 6 \times Red - 7.5 \times Blue + 1} \right) - 0.118 \quad (2)$$

که در آن، NIR: باند مادون قرمز نزدیک (باند ۵)، Red: باند قرمز (باند ۴)، Blue: باند آبی (باند ۲) است.

شاخص‌های سنجش از دور

در تحقیق حاضر به منظور برآورد تبخیر و تعرق براساس الگوریتم سبال از سه شاخص LAI، NDVI و LST استفاده شده است.

شاخص اختلاف پوشش گیاهی نرمال شده (NDVI^۳)، ترکیبی از فرمولاسیون اختلاف نرمال آن و استفاده از بالاترین مناطق جذب و بازتاب کلروفیل، آن را در طیف گسترده‌ای از شرایط مقاوم می‌کند. یک شاخص استاندارد برای پوشش گیاهی است که با استفاده از باندهای مادون قرمز نزدیک و قرمز براساس رابطه ۱ محاسبه می‌شود. بازه این شاخص بین -۱ تا +۱ است [۱۶].

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red} \quad (1)$$

که در آن، NIR: باند مادون قرمز نزدیک (باند ۵)، Red: باند قرمز (باند ۴) است.

سانتی‌متر و ضریب بازتابش (Albedo) ۲۳ درصد است که کل سطح پوشش گیاهی یک برگ بزرگ با روزنه‌های موجود در آن در نظر گرفته می‌شود. مقدار تبخیر و تعرق مرجع از رابطه ۶ محاسبه شده است [۲۰].

$$ET_r = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \left(\frac{890}{T + 273.15} \right) u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (6)$$

که در آن، ET_r^f : تبخیر و تعرق مرجع (mm/day)، Δ : شیب منحنی فشار بخار (kPa/°C)، R_n : تابش خالص در سطح پوشش گیاهی ($MJ m^{-2} day^{-1}$)، G : شار گرما به داخل خاک ($MJ m^{-2} day^{-1}$)، γ : ضریب رطوبتی (kPa/°C)، T : متوسط دمای روزانه هوا در ارتفاع ۲ متری از سطح زمین (°C)، u_2 : سرعت باد در ارتفاع ۲ متری از سطح زمین (m/s)، e_s : فشار بخار اشباع در ارتفاع ۲ متری از سطح زمین (kPa)، e_a : فشار بخار واقعی در ارتفاع ۲ متری از سطح زمین (kPa) [۲۰].

الگوریتم بیان انرژی سطح (SEBAL)

در الگوریتم سبال، تبخیر و تعرق به کمک تصاویر ماهواره‌ای و داده‌های هواشناسی محاسبه می‌شود [۲۱] مقدار تبخیر و تعرق از رابطه ۷ قابل محاسبه است.

$$\lambda ET = R_n - G - H \quad (7)$$

که در آن، λET^h : شار گرمای نهان (W/m^2)، R_n^f : شار تابش خالص سطح (W/m^2)، G^y : شار گرمای خاک (W/m^2)، H^h : شار گرمای محسوس (W/m^2) است. شار تابش خالص سطح (R_n) بیانگر انرژی تابشی واقعی موجود در سطح است. با کسر کلیه شارهای تابشی خروجی از کلیه شارهای تابشی ورودی محاسبه می‌شود. در رابطه ۸ اجزاء تعادل تابش سطح نشان داده شده است [۲۱].

$$R_n = (1 - \alpha) R_{s\downarrow} + R_{L\downarrow} - R_{L\uparrow} - (1 - \epsilon_0) R_{L\uparrow} \quad (8)$$

که در آن، α^g : بازتابش ذرات سطح (آلبیدو سطح)، $R_{s\downarrow}^{10}$: طول موج کوتاه ورودی (W/m^2)، $R_{L\downarrow}^{11}$: طول موج بلند

دمای سطح زمین (LST^1)، براساس روابط ۳ و ۴ محاسبه شده است [۱۸ و ۱۹].

$$LST = \frac{BT}{1 + \left(L_\lambda \times \frac{BT}{\rho} \right) \times \ln \epsilon_0} \quad (3)$$

$$BT = \frac{K_2}{\ln \left(\frac{K_1}{L_\lambda} + 1 \right)} \quad (4)$$

که در آن، BT^2 : دمای روشنایی بالای اتمسفر (K)، L_λ : تابش طیفی، ϵ_0^3 : گسیلندگی سطح زمین (ϵ_0) (جدول ۲)، K_1 و K_2 ضرایب ثابت کالیبراسیون هستند. مقادیر K_1 و K_2 برای ماهواره لندست ۸ به ترتیب برابر با $W cm^{-2} sr^{-1}$ ($774/89 \mu m^{-1}$) و $1321/0.8$ (K) هستند. مقدار ρ نیز از ثابت پلانک (h)، سرعت نور (c) و ثابت بولتزمن (σ) براساس رابطه ۵ محاسبه شده است [۱۸ و ۱۹].

$$\rho = \frac{h \times c}{\sigma} = 1.43878 \times 10^{-2} mK \quad (5)$$

جدول ۲. گسیلندگی سطح زمین

NDVI	گسیلندگی سطح زمین (ϵ_0)
$NDVI < -0.185$	۰/۹۹۵
$-0.185 \leq NDVI < 0.157$	۰/۹۷۰
$0.157 \leq NDVI \leq 0.661$	$1/0.094 + 0/0.47 \ln(NDVI)$
$NDVI > 0.661$	۰/۹۹۰

در این تحقیق به منظور تحلیل و تفکیک اطلاعات تصاویر ماهواره‌ای و شاخص‌های مبتنی بر آن از آزمون آماری T-test در نرم افزار SPSS استفاده شده است.

روش پنمن-مانتیث-فائو

همان‌گونه که اشاره شد، مقادیر نیاز آبی دو محصول گندم و کلزا با استفاده از اطلاعات بهنگام هواشناسی محاسبه شده است. با توجه به آنکه روش پنمن-مانتیث-فائو از معتبرترین روش‌های محاسبه نیاز آبی مرجع (تبخیر و تعرق مرجع) است. بنابراین، برآورد نیاز آبی دو محصول، بر مبنای روش پنمن-مانتیث-فائو بوده است. در این روش گیاه مرجع یک پوشش چمن فرضی با ارتفاع ۱۲

4. Evapotranspiration Reference
5. Latent Heat Flux
6. Net Surface Radiation
7. Soil Heat Flux
8. Sensible Heat Flux
9. Surface Albedo
10. Incoming Shortwave Radiation
11. Incoming Longwave Radiation

1. Land Surface Temperature
2. Brightness Temperature
3. Land Surface Emissivity

$$\lambda = (2.501 - 0.002361(LST - 273.15)) \times 10^6 \quad (14)$$

که در آن، ET_{day} : تبخیر و تعرق روزانه (mm/day)، ET_{TrF} : کسر تبخیر و تعرق مرجع (مقدار آن بین ۰ تا ۱ است، اما در بعضی از موارد می‌تواند تا ۱/۱ افزایش یابد)، ET_{r-day} : تبخیر و تعرق مرجع روزانه (mm/day)، ET_{inst} : تبخیر و تعرق لحظه‌ای (mm/hr)، ET_{r-hr} : تبخیر و تعرق مرجع لحظه‌ای (mm/hr)، λ : مقدار گرمای نهان تبخیر (J/kg) است.

معیارهای آماری برای مقایسه روابط

برای ارزیابی داده‌ها از ضریب همبستگی بین داده‌ها (R^2)، جذر میانگین مربع خطا ($RMSE^5$)، انحراف نتایج (MBE^6) و میانگین خطای مطلق (MAE^7) استفاده شده است.

همچنین، در این تحقیق به منظور تحلیل شاخص‌های سنجش از دور از آزمون T-test تک‌نمونه‌ای^۸ استفاده شده است. این آزمون برای تعیین اختلاف معناداری میانگین تغییرات شاخص‌های سنجش از دور در دو محصول گندم و کلزا به کار گرفته شده است.

یافته‌ها

براساس داده‌های هواشناسی بهنگام ایستگاه هواشناسی کشاورزی، مقادیر نیاز آبی طی دوره رشد دو محصول با استفاده از قابلیت‌های نرم‌افزار 8.0 CROPWAT محاسبه شده که در شکل ۲ و شکل ۳ تغییرات مقادیر نیاز آبی دو محصول نشان داده شده است.

در گام بعد از شاخص‌های پوشش گیاهی NDVI و LAI دو محصول گندم و کلزا برای برآورد تبخیر و تعرق گیاهی در الگوریتم سبال استفاده شد (شکل ۴ و شکل ۵). در شکل ۶ و شکل ۷ توزیع زمانی تبخیر و تعرق واقعی گیاه در دوره‌های ۱۶ روزه با استفاده از تصاویر ماهواره لندست ۸ در مزارع گندم و کلزا و داده‌های بهنگام مدل پنمن-مانتیث-فائو طی دوره رشد نشان داده شده است.

ورودی (W/m^2) ، R_{L1}^1 : طول موج بلند خروجی (W/m^2) ، ε_0 : گسیلندگی سطح (جدول ۲) است. بازتابش ذرات (Albedo)، ضریب بازتاب ذرات از سطوح مختلف (آب، خاک، گیاه) است که مقدار آن بسته به کیفیت و عمق آب، نوع خاک و نوع گیاه (حتی برای یک گیاه طی فصل رشد) متفاوت است.

شار گرمای خاک (G)، میزان ذخیره گرمای داخل خاک و پوشش گیاهی در اثر هدایت مولکولی است که براساس رابطه ۹ محاسبه شده است [۲۲].

$$G = R_n \left(\frac{LST - 273.15}{\alpha} \right) (0.0038\alpha + 0.0074\alpha^2) (1 - 0.98NDVI^4) \quad (9)$$

که در آن، R_n : شار تابش خالص سطح (W/m^2) ، LST : دمای سطح زمین (K)، α : بازتابش ذرات، NDVI: شاخص اختلاف پوشش گیاهی نرمال شده است.

شار گرمای محسوس (H)، میزان تلفات گرمایی هوا توسط همرفت و هدایت مولکولی به دلیل اختلاف دماست که به کمک معادله انتقال گرما براساس رابطه ۱۰ قابل محاسبه است [۲۱].

$$H = \frac{\rho \times C_p \times dT}{r_{ah}} \quad (10)$$

که در آن، ρ : چگالی هوا ($1/2754 \text{ kg/m}^3$)، C_p^2 : گرمای ویژه هوا ($1004 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$)، dT^3 : اختلاف دما بین دو ارتفاع Z_1 و Z_2 (K)، r_{ah}^4 : مقاومت آیرودینامیک برای انتقال گرما (S/m) است.

با محاسبه مقادیر R_n ، G و H مقدار λET از رابطه ۷ تعیین می‌شود. در این راستا، تبخیر و تعرق روزانه براساس روابط ۱۱-۱۴ قابل محاسبه است [۲۱].

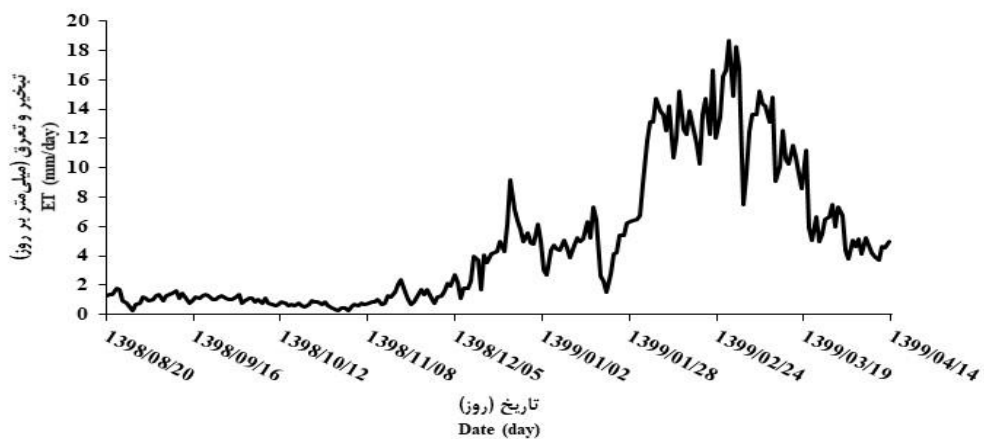
$$ET_{day} = ET_{TrF} \times ET_{r-day} \quad (11)$$

$$ET_{TrF} = \frac{ET_{inst}}{ET_{r-hr}} \quad (12)$$

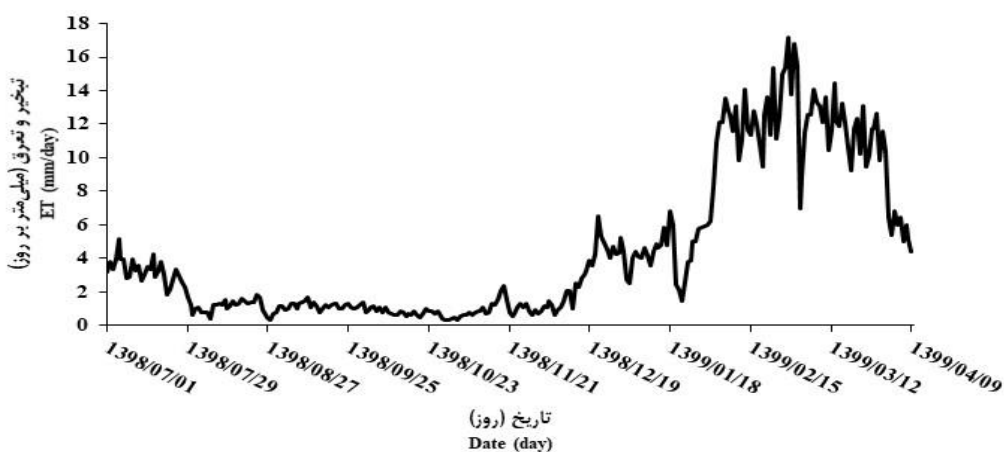
$$ET_{inst} = 3600 \times \frac{\lambda ET}{\lambda} \quad (13)$$

5. Root Mean Square Error
6. Mean Bias Error
7. Mean Absolute Error
8. One Sample T-test

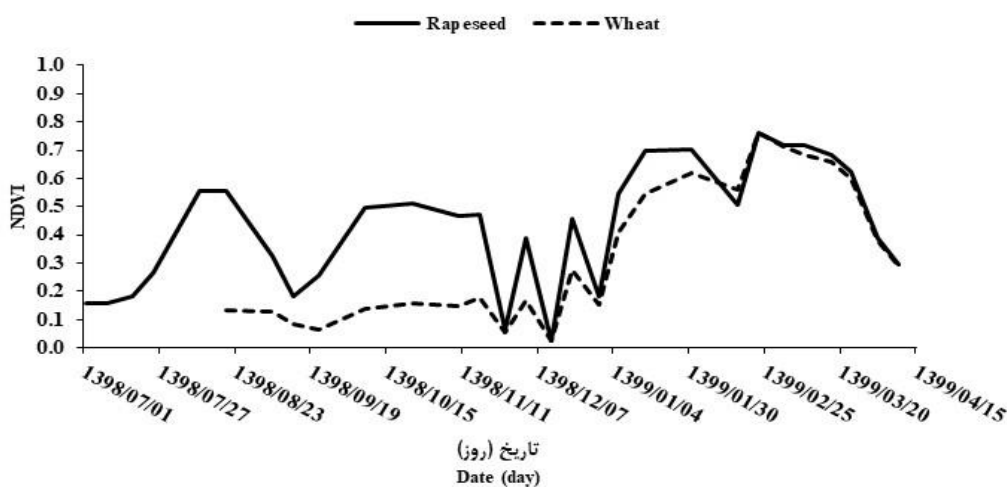
1. Outgoing Longwave Radiation
2. Air Specific Heat
3. Temperature Differential
4. Aerodynamic Resistance to Heat Transport



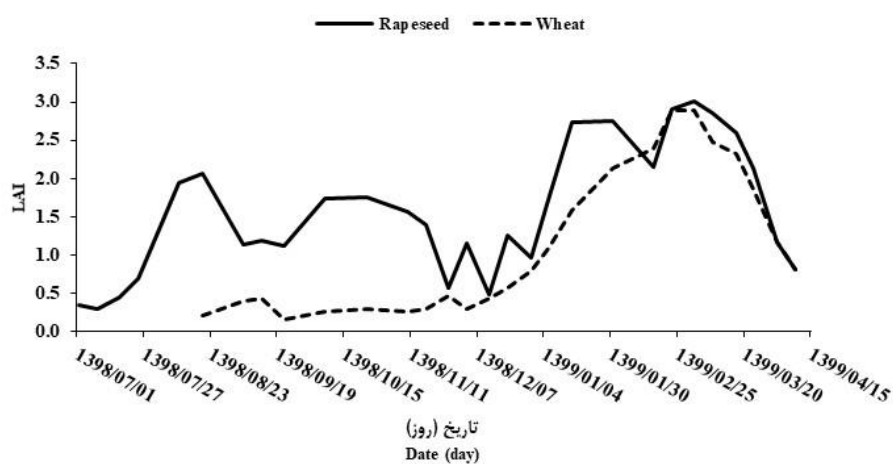
شکل ۲. نمودار تغییرات تبخیر و تعرق روزانه محصول گندم طی دوره رشد براساس اطلاعات بهنگام هواشناسی



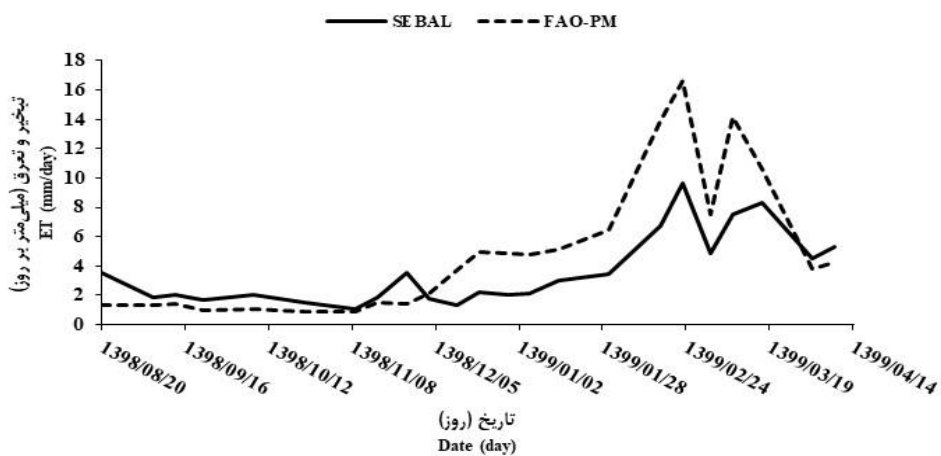
شکل ۳. نمودار تغییرات تبخیر و تعرق روزانه محصول کلزا طی دوره رشد براساس اطلاعات بهنگام هواشناسی



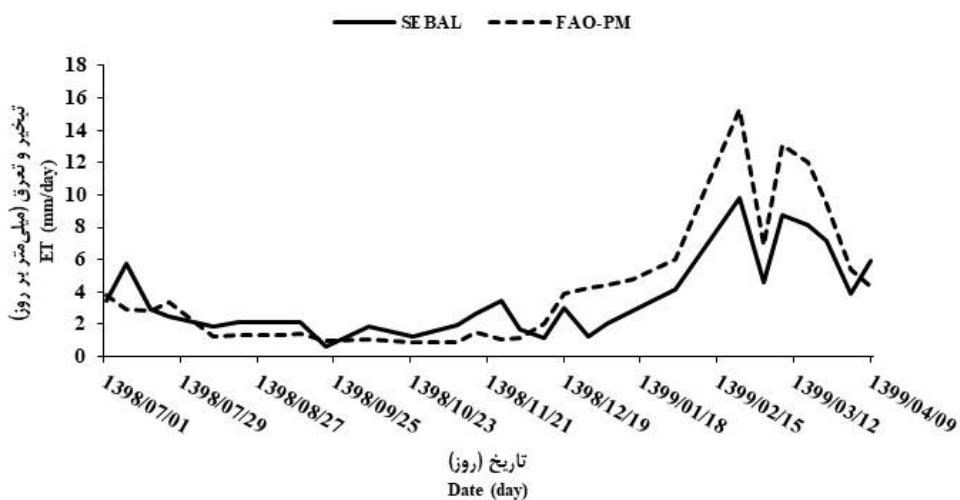
شکل ۴. نمودار تغییرات شاخص NDVI محصول گندم و کلزا طی دوره رشد فنولوژیک



شکل ۵. نمودار تغییرات شاخص LAI محصول گندم و کلزا طی دوره رشد فنولوژیک



شکل ۶. نمودار توزیع زمانی تبخیر و تعرق واقعی گندم در الگوریتم سبال و پنمن-مانتیث-فائو



شکل ۷. نمودار توزیع زمانی تبخیر و تعرق واقعی کلزا در الگوریتم سبال و پنمن-مانتیث-فائو

همان‌طور که در شکل ۶ و شکل ۷ نشان داده شده است مقادیر تخمینی تبخیر و تعرق گیاهی در دوره بهاره رشد محصولات در مدل سبال کمتر از مدل پنمن-مانتیت بوده است. نتایج به‌دست‌آمده با نتایج پژوهش کرباسی و همکاران [۹]، کریمی و همکاران [۷]، راموس و همکاران [۴] و پاپادیوید و همکاران [۲۳] همخوانی داشت. این تفاوت بین مقادیر تبخیر و تعرق واقعی گیاه در ابتدا و انتهای دوره رشد با سایر روزهای فصل رشد می‌تواند به دلیل خطای تعیین فاکتور تصحیح سطح خاک مرتبط باشد. به منظور بررسی اختلاف دو روش یادشده در برآورد نیاز آبی نمودار برازش مقادیر متناظر هر دو روش در شکل ۸ و شکل ۹ نشان داده شده است. نتایج پژوهش کاویانی و همکاران (۱۳۹۰) نشان داد امکان کاربرد الگوریتم سبال در اقلیم دشت قزوین وجود داشته و دقت زیادی را تولید می‌کند [۲۴]. در این راستا، نتایج پژوهش حاضر نشان‌دهنده آن است که مقدار تبخیر و تعرق روزانه محاسباتی محصول گندم براساس الگوریتم سبال، در بازه ۱/۰۶ تا ۹/۶۸ میلی‌متر بر روز طی ماه‌های مهر تا تیر متغیر بوده که حداکثر میزان تبخیر و تعرق روزانه در تاریخ ۱۳۹۹/۰۲/۲۳ بوده است. همچنین، مقادیر تبخیر و تعرق روزانه محاسباتی محصول کلزا نیز براساس الگوریتم سبال در بازه ۰/۶۲ تا ۹/۷۸ میلی‌متر بر روز بوده که حداکثر میزان تبخیر و تعرق روزانه این محصول در تاریخ ۱۳۹۹/۰۲/۲۳ بوده است. کاویانی و همکاران (۱۳۹۰)، مقدار تبخیر و تعرق روزانه ترکیب کشت محصولات در دشت قزوین که با استفاده از تصاویر MODIS و الگوریتم سبال انجام گرفت بین ۳/۲ تا ۴/۶ میلی‌متر بر روز در اردیبهشت‌ماه برآورد کردند [۲۴]. کاویانی و همکاران (۱۳۹۲) مقدار تبخیر و تعرق روزانه ترکیب کشت محصولات در دشت قزوین با الگوریتم سبال را بین ۳/۴ تا ۴/۶ برای تصاویر MODIS و برای تصاویر AVHRR بین ۴/۳ تا ۵/۳ برآورد کردند [۲۵]. در حالی که عبدالهی دهکی و دانش‌کار آراسته (۱۳۹۳)، مقدار تبخیر و تعرق روزانه ترکیب کشت محصولات زراعی در شبکه آبیاری دشت قزوین را بین ۵ تا ۹ میلی‌متر بر روز در دوره حداکثر نیاز آبی برآورد کردند [۲۶]. همچنین، خوش‌نواز و همکاران (۱۳۹۴) مقدار تبخیر و تعرق روزانه در اراضی تحت پوشش شبکه آبیاری دشت قزوین را بین ۳/۸ تا ۶/۷

میلی‌متر بر روز تخمین زدند [۸]. نظری و کاویانی (۱۳۹۵) مقدار تبخیر و تعرق روزانه ترکیب کشت محصولات در اراضی پایین‌دست شبکه آبیاری دشت قزوین با الگوریتم سبال و متریک را با استفاده از تصاویر لندست ۸ بین ۲ تا ۴ میلی‌متر بر روز در اردیبهشت‌ماه برآورد کردند [۲۷]. این در حالی است که فیروزی نظام‌آبادی و همکاران (۱۳۹۷) مقدار تبخیر و تعرق روزانه محصولات در اراضی پایین‌دست شبکه آبیاری دشت قزوین با الگوریتم سبال را با استفاده از تصاویر MODIS بین ۲ تا ۸ میلی‌متر بر روز در ماه‌های خرداد تا مهر و با استفاده از تصاویر لندست ۷ بین ۲ تا ۸/۵ میلی‌متر بر روز در ماه‌های خرداد تا مرداد تخمین زدند [۲۸].

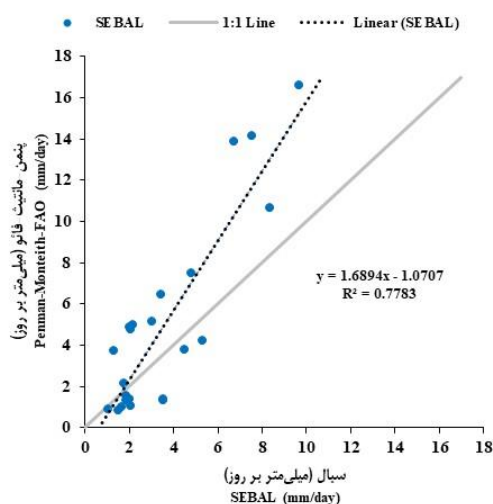
همان‌طور که در بخش مواد و روش‌ها اشاره شد برای ارزیابی عملکرد الگوریتم سبال در تخمین تبخیر و تعرق واقعی گیاه از سه شاخص مجذور میانگین مربعات خطا، خطای انحراف از میانگین و خطای قدر مطلق میانگین استفاده شد که در جدول ۳ به نتایج ارزیابی اشاره شده است. در شکل ۳ و شکل ۴ مقدار ضریب تبیین مقادیر تبخیر و تعرق گیاه در الگوریتم سبال با مقادیر تخمینی تبخیر و تعرق گیاه در مدل پنمن-مانتیت-فائو به‌ترتیب برای گندم و کلزا، ۰/۷۸ و ۰/۸۱ بوده است. همچنین، میزان خطای مدل در برآورد تبخیر و تعرق گندم و کلزا براساس شاخص آماری (RMSE) به‌ترتیب ۳/۰۴ و ۲/۰۹ میلی‌متر بر روز، محاسبه شده است (جدول ۳).

با توجه به جدول ۳ و شکل ۸ و شکل ۹ مقادیر شاخص MBE، ۱/۳۸ و ۰/۶۷ (میلی‌متر بر روز) که به‌ترتیب برای گیاه گندم و کلزا به دست آمد، بیانگر این موضوع است که مقادیر تخمینی تبخیر و تعرق واقعی برای گیاه گندم و کلزا به الگوریتم سبال کمتر از مقادیر پنمن-مانتیت-فائو به دست آمده است. این روند تخمین کمتر از ابتدا تا انتهای طول دوره رشد گیاه، با توجه به مطالعات صورت‌گرفته در زمینه الگوریتم سبال همخوانی دارد. آلن و همکارانش (۲۰۰۲)، در زمینه تخمین تبخیر و تعرق واقعی گیاه چغندر قند با استفاده از الگوریتم سبال مشاهده کردند که بیشترین خطا در برآورد در دو دوره ابتدایی و انتهایی رشد حادث می‌شود [۲۹]. کریمی و همکارانش (۱۳۹۱) نیز در برآورد تبخیر و تعرق واقعی گیاه ذرت مشاهده کردند که مدل سبال در ابتدای فصل رشد مقدار تبخیر و

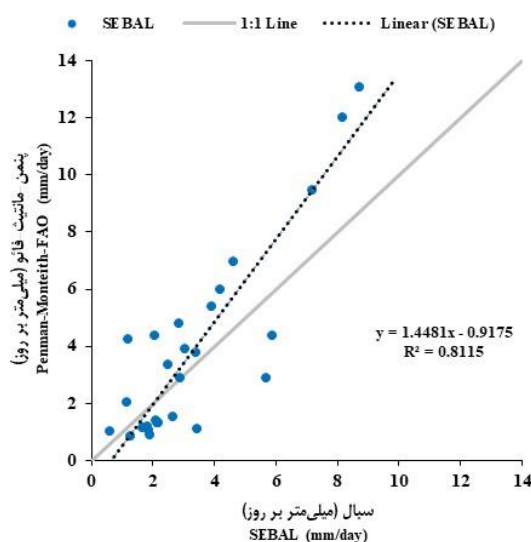
الگوی متفاوت رشد از نظر شاخص‌های پوشش گیاهی و بازتاب طیفی دما (شکل ۴ و شکل ۵) بوده و به تبع آن، مقادیر متفاوت تبخیر و تعرق گیاهی داشته‌اند. همچنین، اختلاف معنادار بازتاب‌های طیفی شاخص‌های سنجش از دور نشان داد در برآورد دقیق تبخیر و تعرق گیاهی در عرصه‌های وسیع، امکان تفکیک این دو محصول براساس بازتاب‌های طیفی سنجش از دور وجود دارد.

در جدول ۵ مقادیر نیاز آبی محاسباتی به روش ریزمقیاس‌نمایی و برآورد تبخیر و تعرق براساس الگوریتم سبال در محدوده مطالعاتی نشان داده شده است.

تعرق را بیشتر از مقدار واقعی محاسبه می‌کند. براساس نتایج تحقیق در دوره پیک نیاز آبی هر دو محصول، مقادیر تبخیر و تعرق محاسباتی به روش سبال کمتر از مقادیر محاسباتی نیاز آبی به روش پنمن-مانتیت-فائو بوده است [۷]. با توجه به آنکه مبنای محاسباتی الگوریتم سبال مبتنی بر اطلاعات مستخرج از تصاویر ماهواره‌ای است در جدول ۴ نتایج آزمون T تک‌نمونه‌ای برای سنجش اختلاف بازتاب‌های طیفی دو محصول گندم و کلزا نشان داده شده است. نتایج تحلیل آزمون T تک‌نمونه‌ای نشان داد بازتاب طیفی هر دو محصول طی دوره رشد اختلاف معناداری با هم داشته است. به همین دلیل، دو محصول یادشده دارای



شکل ۸. نمودار برازش تبخیر و تعرق روزانه گندم محاسبه‌شده توسط الگوریتم سبال و پنمن-مانتیت-فائو



شکل ۹. نمودار برازش تبخیر و تعرق روزانه کلزای محاسبه‌شده توسط الگوریتم سبال و پنمن-مانتیت-فائو

جدول ۳. نتایج تحلیل آماری مقادیر محاسباتی تبخیر و تعرق به روش ریزمقیاس‌نمایی و الگوریتم سبال

MAE (mm/day)	MBE (mm/day)	RMSE (mm/day)	R ²	نوع محصول
۲/۲۷	۱/۳۸	۳/۰۴	۰/۷۸	گندم
۱/۶۴	۰/۶۷	۲/۰۹	۰/۸۱	کلزا

جدول ۴. تحلیل آزمون T تک‌نمونه‌ای برای سنجش اختلاف بازتاب‌های طیفی دو محصول گندم و کلزا

فاصله اطمینان ۹۵ درصد		آمار تحلیلی			محصول	شاخص
کران پائین	کران بالا	معناداری دو دامنه‌ای	درجه آزادی	مقدار t		
۰/۲۲۶۶۱	۰/۴۳۴۷۳	۰/۰۰۰	۲۳	۶/۵۴۲	گندم	شاخص اختلاف پوشش گیاهی
۰/۳۶۹۳۵	۰/۵۴۸۲۳	۰/۰۰۰	۲۳	۱۰/۵۷۴	کلزا	نرمال شده (NDVI)
۰/۷۰۲۹۲	۱/۵۰۳۴۹	۰/۰۰۰	۲۳	۵/۶۷۷	گندم	شاخص سطح برگ (LAI)
۷/۰۰۱۹۵	۲/۰۴۴۹۴	۰/۰۰۰	۲۳	۴/۱۵۷	گندم	بازتاب دمای سطح زمین
۶/۷۵۸۴۶	۲۰/۱۷۸۲۱	۰/۰۰۰	۲۳	۴/۱۴۸	کلزا	(LST)

جدول ۵. مقادیر نیاز آبی دو محصول گندم و کلزا در سال زراعی ۱۳۹۸-۱۳۹۹

کلزا (مترمکعب بر هکتار)	گندم (مترمکعب بر هکتار)	نیاز آبی
۱۲۲۶۴	۱۱۴۴۴	داده‌های بهنگام هواشناسی (ریزمقیاس)
۹۱۸۷	۸۳۴۷	الگوریتم سبال

به منظور اعمال برنامه‌ریزی آبیاری منطبق با شرایط مزرعه، برآورد بهنگامی از نیاز آبی محصولات وجود داشته باشد. بنابراین، در صورت دسترسی به اطلاعات بهنگام ایستگاه‌های هواشناسی و یا استفاده از قابلیت‌های فناوری سنجش از دور، می‌توان تبخیر و تعرق واقعی و به تبع آن نیاز آبی محصولات در دوره رشد زراعی را برآورد کرد.

بحث و نتیجه‌گیری

الگوریتم سبال رابطه کامل بیلان انرژی را به منظور محاسبه تبخیر و تعرق واقعی گیاه استفاده می‌کند، بنابراین استخراج میزان تبخیر و تعرق از تصاویر ماهواره‌ای راهکاری مناسبی برای ارتقای مدیریت منابع آب در بخش کشاورزی خواهد بود. نکته حائز اهمیت آن است که با توجه به تغییرات اقلیمی حادث شده مقادیر نیاز آبی بهنگام محصولات زراعی و باغی بی‌شک با مقادیر ارائه شده در سند ملی آب کشاورزی و غیره متفاوت خواهد بود و در صورت بی‌توجهی به این مسئله برنامه‌ریزی کلان در حوزه منابع آب کشاورزی منجر به بهبود کارایی مصرف آب کشاورزی نخواهد شد. بنابراین،

نتایج برآورد نیاز آبی دو محصول گندم و کلزا در محدوده مطالعاتی نشان داد مقادیر محاسباتی با داده‌های سند ملی آب کشاورزی تفاوت داشته است. به نحوی که مقادیر نیاز آبی دو محصول براساس داده‌های سند ملی آب به ترتیب ۲۹۰۰ و ۴۲۴۰ مترمکعب بر هکتار بوده است. به بیانی، نمی‌توان فقط بر مبنای آمار بلندمدت هواشناسی برآورد دقیقی از نیاز آبی محصولات داشت و لازم است برآوردی از تبخیر و تعرق براساس وضع موجود در اختیار بهره‌برداران قرار داده شود. نتایج پژوهش خدارحمی و ابراهیمی‌پاک (۱۳۹۰) که در دشت قزوین با استفاده از داده‌های بهنگام هواشناسی نشان داد نیاز آبی محاسباتی براساس داده‌های بهنگام هواشناسی به طور متوسط ۲۵ درصد بیشتر از داده‌های لایسیمتری و ۷ درصد بیشتر از مقادیر نیاز آبی موجود در سند ملی آب بوده است [۳۰]. همچنین، زارع ایبانه و همکاران (۱۳۹۸) مقادیر نیاز آبی گندم را با استفاده از روش پنمن-مانتیث-فائو و براساس داده‌های بلندمدت ۴۷۴۰ مترمکعب بر هکتار برآورد کردند [۳۱]. در این راستا، با توجه به تغییرات شدید متغیرهای هواشناسی طی سال‌های مختلف زراعی لازم است

- Spain. Agricultural water management. 2009; 96(4): 638-652.
- [5]. Awada H, Di Prima S, Sirca C, Giadrossich F, Marras S, Spano D, et al. Daily Actual Evapotranspiration Estimation in a Mediterranean Ecosystem from Landsat Observations Using SEBAL Approach. *Forests*. 2021; 12(189): 1-20.
- [6]. Li X, Xu X, Wang X, Xu S, Tian W, Tian J, et al. Assessing the Effects of Spatial Scales on Regional Evapotranspiration Estimation by the SEBAL Model and Multiple Satellite Datasets: A Case Study in the Agro-Pastoral Ecotone, Northwestern China. *Remote Sensing*. 2021; 13(1524): 1-22.
- [7]. Karimi A, Farhadi Bansouleh B, Hesadi H. Estimation of Regional Evapotranspiration Using LANDSAT TM Images and SEBAL Algorithm. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*. 2013; 4(6): 353-364 [Persian].
- [8]. Khoshnavaz F, Honar T, Daneshkar Arasteh P. Estimation of Agricultural Water Productivity Using Remote Sensing Technology (Case Study: Qazvin Plain Irrigation Network). *Water and Soil Science*. 2015; 25(1-4): 57-68 [Persian].
- [9]. Karbasi M, Moghadam M, Nikbakht J, Kaviani A. Estimation of Crop Actual Evapotranspiration Using SEBAL Algorithm (Case study: Khoramdareh Region at Zanjan province). *Iranian Journal of Ecohydrology*. 2017; 3(3): 427-437 [Persian].
- [10]. Malekpour M, Babazadeh H, Kaveh F, EbrahimiPak NA. Estimation of Actual Evapotranspiration and Water Productivity of Wheat Using SEBAL Algorithm and Landsat 5TM Images. *Journal of Water Research in Agriculture*. 2017; 30(4): 569-582 [Persian].
- [11]. Zamansani E, Khorani A, Sadeghi-e-lari A, Sadidi J. Evaluation of Evapotranspiration of Wheat Using SEBAL Algorithm (Case Study: Agricultural Research Station of Haji Abad). 2018; 49(4): 667-681 [Persian].
- [12]. Ghaderi A, Dasineh M, Shokri M, Abraham J. Estimation of Actual Evapotranspiration Using the Remote Sensing Method and SEBAL Algorithm: A Case Study in Ein Khosh Plain, Iran. *Hydrology*. 2020; 7(36): 1-14.
- [13]. Mahmoodzadeh E, Anvari S. Verification of Estimated Evapotranspiration by Surface Energy Balance Algorithm for Land and the Information of OLI and TIRS Sensors. *Watershed Engineering and Management*. 2021; 13(1): 150-159 [Persian].

برآورد تبخیر و تعرق گیاهی در عرصه‌های کشت محصولات زراعی و باغی می‌تواند اطلاعات بهنگامی از وضعیت موجود مقادیر نیاز آبی در اختیار سیاست‌گذاران، کارشناسان فنی و یا کشاورزان پیشرو قرار دهد تا حداکثر منافع از حجم محدود آب مصرفی حاصل شود. از این‌رو، باید در مبحث مدیریت کلان کشاورزی نگرشی پویا و بهنگام به مقوله نیاز آبی محصولات زراعی داشت و از رویکرد صرف به مدیریت ایستا در تعیین نیاز آبی محصولات کشاورزی گذر کرد. هرچند در تحقیق این امر لازم است اطلاعات زمین مرجع دقیق همانند اطلاعات لایسیمتری و یا اطلاعات بهنگام هواشناسی در کنار فناوری سنجش از دور به کار گرفته شود. همچنین، نتایج پژوهش نشان داد مقادیر نیاز آبی محاسباتی از طریق ریزمقیاس‌نمایی اطلاعات هواشناسی با مقادیر نیاز آبی منطق بر اطلاعات سند ملی آب کشاورزی (برای گندم ۲۹۰۰ و برای کلزا ۴۲۴۰ مترمکعب بر هکتار) متفاوت بوده است. بنابراین، باید تا مقادیر نیاز آبی در بهره‌برداری و طراحی سامانه‌های آبیاری تحت فشار، براساس اطلاعات بهنگام هواشناسی محاسبه و اعمال شود.

سپاسگزاری

به این وسیله، از جناب آقای سبزی، جناب مهندس حسینی‌بای و جناب دکتر شهبابی‌فر جهت همکاری، مساعدت و در دسترس قرار دادن اطلاعات در این پژوهش تشکر و قدردانی می‌شود.

منابع

- [1]. Niroumand HA. Applied multivariate statistical analysis. Mashhad: Ferdowsi University of Mashhad; 1999 [Persian].
- [2]. Karimi AR. Evaluation of remote sensing algorithms (SEBAL and SEBS) for calculation of evapotranspiration using satellite images. MSc. Thesis, Razi University, Kermanshah, 105 pages. 2011. [Persian].
- [3]. Bastiaanssen W, Ahmad MD, Chemin Y. Satellite surveillance of evaporative depletion across the Indus Basin. *Water Resources Research*. 2002; 38(12): 1273-1281.
- [4]. Ramos JG, Cratchley CR, Kay J, Casterad M A, Martínez-Cob A, Dominguez R. Evaluation of satellite evapotranspiration estimates using ground-meteorological data available for the Flumen District into the Ebro Valley of NE

- [14]. Farshi AA, Shariati MR, Jarollahi R, Ghaemi MR, Shahabifar M, Tavallaei MM. An Estimate of Water Requirement of Main Field Crops and Orchards in Iran. 1 edition. Karaj: Agricultural Education and Extension Research Organization. 1997 [Persian].
- [15]. Moayeri M. Determination of Water Requirement and Comprehensive Irrigation Management of Rapeseed Farms. Institute of Agricultural Engineering and Technical Research, Agricultural Education and Extension Research Organization. 2019 [Persian].
- [16]. Rouse J, Haas R, Schell J, Deering D. Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS. Third ERTS Symposium NASA. 1973; 309-317.
- [17]. Boegh E, Soegaard H, Broge N, Hasager CB, Jensen NO, Schelde K, et al. Airborne multispectral data for quantifying leaf area index, nitrogen concentration, and photosynthetic efficiency in agriculture. Remote Sensing of Environment. 2002; 81: 179-193.
- [18]. Faris Beg AA, Al-Sulttani AH, Ochtyra A, Jarocińska A, Marcinkowsk A. Estimation of Evapotranspiration Using SEBAL Algorithm and Landsat-8 Data-A Case Study: Tatra Mountains Region. Journal of Geological Resource and Engineering. 2016; 6: 257-270.
- [19]. Ihlen V, Zanter K. Landsat 8 (L8) Data Users Handbook. Department of the Interior. U.S. Geological Survey. Version 5.0. 2019.
- [20]. Alizadeh A. Soil, Water, Plant Relationship. 14th edition. Mashhad: Sadjad University; 2014 [Persian].
- [21]. Allen R, Tasumi M, Trezza R. SEBAL (Surface Energy Balance Algorithms for Land) Advanced Training and User's Manual. Idaho Implementation, Version 1.0. 2002.
- [22]. Bastiaansen WGM. Regionalization of surface flux densities and moisture indicators in composite terrain: A remote sensing approach under clear skies in Mediterranean climates. Ph.D. Dissertation, CIP Data Koninklijke Bibliotheek, Den Haag, The Netherlands. 1995
- [23]. Papadavid G, Hadjimitsis D, Toullos L, Michaelides S. A Modified SEBAL Modeling Approach for Estimating Crop Evapotranspiration in Semi -arid Conditions. Water Resources Management. 2013; 27(9): 3493 -3506.
- [24]. Kaviani A, Sohrabi T, Daneshkar Arasteh P. Evapotranspiration and Water Productivity Estimation Using SEBAL Algorithm and Comparison With Lysimeter Data. Iranian Journal of Irrigation and Drainage. 2011; 5(2): 165-175 [Persian].
- [25]. Kaviani A, Sohrabi T, Daneshkar Arasteh P. Estimation of Agricultural Water Productivity in Qazvin Plain Using MODIS, AVHRR Images and Lysimeter Data. Iranian Water Researches Journal. 2013; 7(2): 1-10 [Persian].
- [26]. Abdollahi Dehaki Z. Study of Irrigation Adequacy and Determination of Irrigated Area of Qazvin Network Using Satellite Imagery and SEBAL Algorithm. MSc. Thesis, Imam Khomeini International University, Qazvin, 115 pages. 2015 [Persian].
- [27]. Nazari R, Kaviani A. Evaluation of the Results of Evapotranspiration Estimation of Grass Reference Plant Using METRIC and SEBAL Models in Qazvin Plain. Journal of Water Research in Agriculture. 2016; 30(2): 187-199 [Persian].
- [28]. Firuzi NezamAbadi F, Kaviani A, Moghadasi M, BahmanAbadi B. Comparison Result of Evaluating Actual Evapotranspiration of Crops and Orchards by SEBS and SEBAL Algorithms (Case study: Qazvin plain). Iranian Journal of Irrigation and Drainage. 2019; 12(5): 1266-1280 [Persian].
- [29]. Allen RG, Morse A, Tasumi M, Trezza R, Bastiaansen W, Wright JL, et al. Evapotranspiration from a satellite -based surface energy balance for the Snake Plain Aquifer in Idaho. Proc. USCID Conference. 2002.
- [30]. Khodarahmi Z, EbrahimiPak NA. Determining the water requirement of wheat in the Qazvin plain by using plant coefficient in real conditions and comparing the results with lysimeter data and the country's national water document. The 11th International Seminar on Irrigation and Evaporation Reduction. Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran. 2011 [Persian].
- [31]. Zare Abyaneh H, Heidari A, Daneshkar Arasteh P. Evaluation of Water Management Performance in Irrigation Network of Qazvin Plain. Journal of Irrigation and Water Engineering. 2020, 10(2): 76-88 [Persian].